

doi:10.3969/j.issn.1001-2400.2015.04.012

# 张拉整体并联机构波浪能采集研究

纪志飞, 李团结, 林 敏

(西安电子科技大学 机电工程学院, 陕西 西安 710071)

**摘要:** 针对传统浮子式波浪能采集装置无法将浮子转动动能转化为电能的问题, 提出了一种张拉整体并联机构波浪能采集装置. 基于线性波理论和拉格朗日方程, 建立了张拉整体并联机构波浪能采集装置的动力学模型, 分析了此装置的浮子在线性波浪作用下的位移和速度, 对比研究了该装置和传统浮子式波浪能采集装置的能量采集效率. 仿真结果表明, 张拉整体并联机构波浪能采集装置比传统浮子式装置能量的采集效率高; 另外, 由于张拉整体并联机构波浪能采集装置中含有弹簧等储能元件, 使得其抵抗极端波浪的能力较强.

**关键词:** 张拉整体; 线性波浪理论; 机构; 能量采集; 动力学分析

**中图分类号:** TP112    **文献标识码:** A    **文章编号:** 1001-2400(2015)04-0070-06

## Research on a tensegrity parallel mechanism for wave energy harvesting

JI Zhifei, LI Tuanjie, LIN Min

(School of Mechano-electronic Engineering, Xidian Univ., Xi'an 710071, China)

**Abstract:** To solve the problem that the conventional floating wave power device can not transform the rotational kinetic energy into electric energy, a novel wave energy harvesting device based on tensegrity parallel mechanisms is proposed. The dynamic model of the novel device is developed on the basis of Airy's linear wave theory and Lagrange's equation. Then, the kinematic and dynamic analyses of the float are made. Afterwards, the efficiency of the novel wave energy harvesting device and conventional floating wave power device is computed and compared. The results indicate that the efficiency of energy harvesting of the proposed device is higher than that of the conventional floating wave power device. Moreover, the ability of the proposed device to resist destructive water waves is better than that of the conventional floating wave power device.

**Key Words:** tensegrity; linear wave theory; mechanisms; energy conversion; dynamic analysis

随着经济与科技的发展,人们对能源的需求与日剧增.同时,煤、石油、天然气等非再生能源已日渐枯竭,并且对这些能源的过度使用带来的环境污染问题也日趋严重.因此,对新能源的研究、开发及应用已迫在眉睫.波浪能作为一种清洁的可再生能源得到了沿海各国的重视<sup>[1-4]</sup>.波浪能采集装置也成为国内外的研究热点<sup>[5]</sup>.我国是一个海洋大国,海岸线总长度超过  $3.2 \times 10^4$  km,可利用的波浪能非常丰富<sup>[1]</sup>.据统计,我国海洋波浪能理论储量为  $1.5 \times 10^8$  kW,是目前我国装机容量的两倍多.所以,开展波浪能采集技术的研究对解决我国能源危机和环境污染问题具有重要的意义.

波浪能采集装置本质上是一种能量转换装置,首先将波浪能转换为机械能,然后再将机械能转换为电能.常见的波浪能采集装置有<sup>[6-10]</sup>: 振荡水柱式、摆式、聚波水库式和浮子式.振荡水柱式波浪能采集装置由一个上下端都开口的空腔和涡轮机组成,在波浪的作用下,空腔内的水柱产生竖直方向的运动,从而挤压空腔上端的空气.气室内的空气受到挤压,通过上端的喷嘴产生高压气流推动涡轮机旋转,从而带动发电机发

收稿日期:2014-03-10

网络出版时间:2014-11-05

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51375360)

作者简介:纪志飞(1984—),男,西安电子科技大学博士研究生,E-mail: zfji18@163.com.

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/doi/10.3969/j.issn.1001-2400.2015.04.012.html>

电. 此类装置的缺点是将波浪能转换为电能之前进行了多级的机械能转换, 发电效率不高. 摆式波浪能采集装置是利用置于海面下的摇板从海浪中吸收波浪能, 再带动发电机发电. 摇板的双向运动降低了此类装置的发电效率. 聚波水库式波浪能采集装置是将波浪能转换为蓄水池中水的势能, 然后再将水的势能转换为电能. 此类发电装置对地形有严格的要求, 并且对波浪能的利用率不高. 浮子式波浪能采集装置是利用在海面上做上升和下沉运动的浮子来吸收波浪能. 文献[11]对国内外已有的波浪能采集装置进行了系统的分析, 并总结了各类装置的优缺点. 在这些装置中, 浮子式装置因具有结构简单和效率高等特点, 引起了学者们的广泛关注. 在波浪的作用下, 浮子获得平动动能和转动动能. 浮子式波浪能采集装置主要将浮子俘获的平动动能通过直线发电机转化为电能, 浮子的转动动能并未得到利用. 针对此问题, 笔者提出了一种新型的浮子式波浪能采集装置——张拉整体并联机构波浪能采集装置, 该装置和传统浮子式装置同样具有结构简单和效率高等特点. 并且, 新装置可以同时将浮子俘获的转动动能和平动动能通过直线发电机转化为电能, 它比传统浮子式装置能量采集效率高. 当极端风浪作用在张拉整体并联机构能量采集装置上时, 装置中的弹簧可以吸收部分能量以减小极端风浪对系统的冲击. 因此, 该装置比传统浮子式装置抵抗极端风浪的能力强.

## 1 线性波理论

线性波<sup>[12]</sup>是指剖面为正弦曲线的波浪, 如图1所示. 波浪的传播方向为Y轴正向, 垂直方向为Z轴方向. 波传播的速度为 $c$ , 波长为 $\lambda$ , 波峰与波谷的垂直距离为 $H$ , 静水面到海底的距离为 $h$ .

波浪的运动可以用其速度势来描述. 设图1所示的线性波浪为理想流体, 则其速度势 $\Phi$ 满足拉普拉斯方程, 即

$$\nabla^2 \Phi = 0, \quad (1)$$

其中,  $\nabla^2$  为拉普拉斯算子. 应用线性化的运动自由表面边界条件和动力自由表面边界条件<sup>[12]</sup>对式(1)求解, 可以得到

$$\left\{ \frac{1}{g} \frac{\partial^2 \Phi}{\partial t^2} + \frac{\partial \Phi}{\partial z} \right\} \bigg|_{z=\eta \approx 0} = 0, \quad (2)$$

$$\eta = \frac{1}{g} \frac{\partial \Phi}{\partial t} \bigg|_{z=\eta}, \quad (3)$$

其中,  $\eta$  为线性波浪自由表面位移函数. 联立式(1)和式(2), 可求出图1所示的线性波浪的速度势为

$$\Phi = \frac{Hg \cosh[k(z+h)]}{2kc \cosh(kh)} \sin[k(y+ct)], \quad (4)$$

其中,  $k$  为常数. 将式(4)代入式(3), 可以得到

$$\eta = (H/2) \cos[k(y-ct)]. \quad (5)$$

联立式(4)和式(5), 可求出线性波的波长和角频率, 即

$$\lambda = \frac{gT^2}{2\pi} \tanh \frac{2\pi h}{\lambda}, \quad \omega = (gk \tanh(kh))^{1/2}, \quad (6)$$

其中,  $T$  为线性波周期. 波长 $\lambda$ 可通过数值迭代法进行求解, 通常情况下其解析表达式不存在. 通过式(4)和式(6), 可以分析波浪自由表面水质点的运动情况和波浪的传播属性.

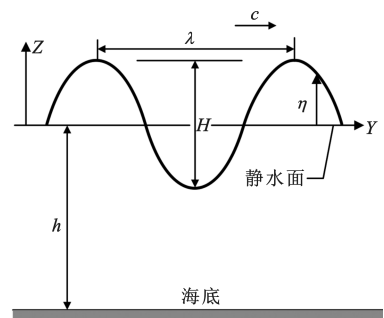


图1 线性波浪示意图

## 2 张拉整体并联机构波浪能采集分析

### 2.1 装置描述

文中提出的张拉整体并联机构波浪能采集装置如图2所示. 该装置由浮子、与浮子相连的4个直线发电机和弹簧组成, 浮子的长和宽均为 $L$ , 高为 $Z_0$ . 下平台 $ABCD$ 通过球面副固定于海底, 其形状为正方形, 边长为 $L$ . 弹簧 $AD_1$ 、 $BA_1$ 、 $CB_1$ 、 $DC_1$ 的弹性系数分别为 $K_1$ 、 $K_2$ 、 $K_3$ 、 $K_4$ , 原长分别为 $L_{10}$ 、 $L_{20}$ 、 $L_{30}$ 、 $L_{40}$ . 定坐标系

的原点固定在下平台的中心,坐标轴的方向如图 2 所示。

## 2.2 动力学模型

假定波浪传播的方向为  $Y$  轴正向,则浮子沿  $X$  方向的平动和绕  $Y$  轴及  $Z$  轴的转动可以忽略.因此,可选用 3 个广义坐标来描述浮子在波浪作用下的运动.设浮子质心在坐标系  $XYZ$  下的坐标为  $(x, y, z)$ ,浮子绕  $X$  轴的转角为  $\theta$ ,选取广义坐标  $\mathbf{q} = [q_1, q_2, q_3]^T = [y, z, \theta]^T$ ,则由文献[12]可知,线性波浪对浮子的作用力及力偶为

$$F = F_{z0} \cos(\omega t) \quad , \quad M = M_{\theta 0} \sin(\omega t) \quad . \quad (7)$$

作用力  $F$  的方向与  $Z$  轴平行,  $M$  的方向与  $X$  轴平行.  $F_{z0}$  和  $M_{\theta 0}$  分别为力和力偶的幅值,其表达式为

$$\begin{cases} F_{z0} = \frac{\rho g H L \lambda}{2\pi} \left( \exp\left(-\frac{2\pi d}{\lambda}\right) + 1 \right) \sin \frac{\pi L}{\lambda} \quad , \\ M_{\theta 0} = \frac{\rho g H L \lambda}{4\pi} \left( \exp\left(-\frac{2\pi d}{\lambda}\right) + 1 \right) \left[ \frac{\lambda}{\pi} \sin \frac{\pi L}{\lambda} - L \cos \frac{\pi L}{\lambda} \right] \quad , \end{cases} \quad (8)$$

其中,  $\rho$  为海水的密度,  $g$  为重力加速度,  $H$  为波高,  $d$  为浮子的吃水深度. 浮子的动能和重力势能分别为<sup>[13]</sup>

$$\begin{cases} T = \frac{1}{2} (m + a_{wy}) \dot{q}_1^2 + \frac{1}{2} (m + a_{wz}) \dot{q}_2^2 + \frac{1}{2} (I_x + A_w) \dot{q}_3^2 \quad , \\ U_p = \frac{1}{2} \rho g L^2 q_2^2 + \frac{g I_x}{2d} q_3^2 \quad , \end{cases} \quad (9)$$

其中,  $I_x$  为浮子绕  $X$  轴的转动惯量,  $m$  为浮子的质量,  $a_{wy}$  和  $a_{wz}$  分别为沿  $Y$  轴和  $Z$  轴的附加质量. 表达式如下:

$$m = \rho d L^2 \quad , \quad a_{wy} = \frac{\rho \pi d^2 L}{4} \quad , \quad a_{wz} = \frac{K_m \rho \pi L^3}{4} \quad , \quad A_w = \frac{K_l \pi \rho L^5}{16} \quad , \quad (10)$$

其中,系数  $K_l$  和  $K_m$  可由文献[12]查表得到. 考虑到弹簧的弹性势能,系统的总势能为

$$U = U_p + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^4 K_i (L_i - L_{i0})^2 \quad . \quad (11)$$

文献[7]指出,传统浮子式装置能量采集效率可用浮子获得的动能和势能进行衡量,直线电机获得的动能可以忽略. 为了比较张拉整体并联机构能量采集装置和传统浮子式装置能量采集效率,可忽略张拉整体并联机构装置中直线电机吸收的动能. 此时,基于拉格朗日法建立新型装置的动力学模型为

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial T}{\partial \dot{\mathbf{q}}} - \frac{\partial T}{\partial \mathbf{q}} + \frac{\partial U}{\partial \mathbf{q}} = \mathbf{Q}_k \quad , \quad (12)$$

其中,  $\dot{\mathbf{q}}$  为系统的广义速度,  $\mathbf{Q}_k$  为系统的广义力,即

$$\mathbf{Q}_k = \left[ -b_{vy} \dot{q}_1, F_{z0} \cos(\omega t) - (b_{vz} + b_{rz} + b_{pz}) \dot{q}_2, M_{\theta 0} \sin(\omega t) - b_{r\theta} \dot{q}_3 \right]^T \quad , \quad (13)$$

其中,  $b_{vz}$  为粘性阻尼;  $b_{vy}$  和  $b_{rz}$  分别为沿  $Y$  轴和  $Z$  轴平动的辐射阻尼;  $b_{r\theta}$  为绕  $X$  轴转动的辐射阻尼;  $b_{pz}$  为动力输出阻尼; 阻尼系数  $b_{vy}$ 、 $b_{vz}$ 、 $b_{rz}$ 、 $b_{pz}$  和  $b_{r\theta}$  可由文献[13]求得. 将式(9)、式(11)和式(13)代入式(12),可得系统的动力学方程为

$$\mathbf{M} \ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{B} \dot{\mathbf{q}} + \mathbf{G} = \mathbf{F} \quad , \quad (14)$$

其中,  $\ddot{\mathbf{q}}$  为系统的广义加速度.

$$\begin{cases} \mathbf{M} = \begin{bmatrix} m + a_{wy} & 0 & 0 \\ 0 & m + a_{wz} & 0 \\ 0 & 0 & I_x + A_w \end{bmatrix} \quad , \quad \mathbf{B} = \begin{bmatrix} b_{vy} & 0 & 0 \\ 0 & b_{rz} + b_{vz} + b_{pz} & 0 \\ 0 & 0 & b_{r\theta} \end{bmatrix} \quad , \\ \mathbf{G} = \left[ \frac{\partial U}{\partial q_1}, \frac{\partial U}{\partial q_2}, \frac{\partial U}{\partial q_3} \right]^T \quad , \quad \mathbf{F} = [0, F_{z0} \cos(\omega t), M_{\theta 0} \sin(\omega t)]^T \quad . \end{cases} \quad (15)$$

式(14)描述了线性波浪作用下张拉整体并联机构能量采集装置的浮子运动规律,它是一个三元二阶微分方程组,采用龙格库塔法可对其进行求解.

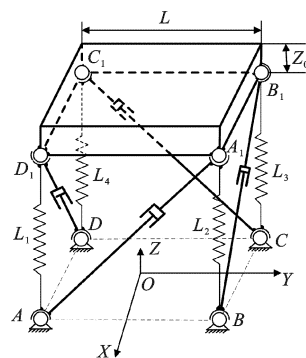


图 2 张拉整体并联机构波浪能采集装置

### 2.3 波浪能采集效率

对于线性波浪,单位周期内的波浪能为<sup>[9]</sup>

$$E = \rho g^2 H^2 T^2 b / (16\pi) \quad (16)$$

其中,  $b$  为波浪的宽度. 假定动力输出阻尼为零 ( $b_{pz} = 0$ ), 即浮子的机械能可以全部转化为电能, 则张拉整体并联机构能量采集装置瞬时发电功率为

$$P = F_{z0} \cos(\omega t) \frac{dq_2}{dt} + M_{z0} \sin(\omega t) \frac{dq_3}{dt} \quad (17)$$

因此, 该装置的能量采集效率可由下式计算:

$$\eta_{ave} = \int_T P dt / E \quad (18)$$

## 3 数值仿真分析

### 3.1 线性波浪参数计算

由式(8)可以看出, 浮子受到的力及力偶与线性波浪的波长和波高有关. 因此, 要分析浮子的运动情况首先要计算线性波浪参数, 包括波长  $\lambda$ 、波速  $c$  和角频率  $\omega$ . 这里采用不动点迭代法来计算线性波浪的波长, 其主要步骤如下:

- (1) 给定精度  $\epsilon$ 、线性波浪周期  $T$  和静水面到海底的距离  $h$  的初始值.
- (2) 给定波长  $\lambda$  的迭代初值  $\lambda^{(0)}$ .
- (3) 计算  $F_A(\lambda) = \lambda$ ,  $F_B(\lambda) = (gT^2 / (2\pi)) \tanh(2\pi h / \lambda)$ .
- (4) 如果  $|F_A(\lambda) - F_B(\lambda)| \geq \epsilon$ , 则令  $\lambda = F_B(\lambda)$ , 转步骤(3).
- (5) 如果  $|F_A(\lambda) - F_B(\lambda)| \leq \epsilon$ , 则输出  $\lambda$ .
- (6) 结束.

设  $H = 0.4 \text{ m}$ ,  $h = 4 \text{ m}$ ,  $T = 0.5 \text{ s}$ , 可计算出波长  $\lambda = 0.39 \text{ m}$ , 波速  $c = 0.78 \text{ m/s}$ , 角频率  $\omega = 12.57 \text{ rad/s}$ .

### 3.2 张拉整体并联机构装置能量采集仿真分析

根据计算出的线性波浪的参数和浮子的几何尺寸可以确定系统动力学方程的系数. 求解动力学模型用到的仿真参数见表1.

表1 动力学模型仿真参数

参数	数值	参数	数值
$m/\text{kg}$	2 575	$\alpha_{wy}/\text{kg}$	40.45
$\alpha_{wz}/\text{kg}$	63 200	$A_w/(\text{kg} \cdot \text{m}^2)$	49 296
$I_x/(\text{kg} \cdot \text{m}^2)$	5 418.20	$b_{rz}/(\text{N} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-1})$	12.65
$b_{r\theta}/(\text{N} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-1})$	26.35	$b_{rz}/(\text{N} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-1})$	12.86
$M_{\theta 0}/(\text{N} \cdot \text{m})$	3 248.30	$F_{z0}/\text{N}$	790.84
$K_2/(\text{N} \cdot \text{m}^{-1})$	150	$K_1/(\text{N} \cdot \text{m}^{-1})$	150
$K_4/(\text{N} \cdot \text{m}^{-1})$	150	$K_3/(\text{N} \cdot \text{m}^{-1})$	150
$L_{20}/\text{m}$	3	$L_{10}/\text{m}$	3
$L_{40}/\text{m}$	3	$L_{30}/\text{m}$	3
$L/\text{m}$	5	$\rho/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	1 030
$d/\text{m}$	0.1	$Z_0/\text{m}$	0.5

由式(7)计算线性波浪对浮子的作用力及力偶, 如图3所示. 采用表1中的仿真参数, 基于龙格库塔法对式(14)进行求解, 可得浮子的运动规律如图4(a)~(c)所示, 装置的发电功率如图4(d)所示.

从图3可以看出, 线性波浪对浮子的作用力及力偶为时间的正弦函数, 力的幅值与力偶的幅值相比较小. 从图4(a)可以看出, 在线性波浪的作用下, 浮子沿波传播方向(Y向)的速度由零逐渐增加到最大值, 然后再衰减为零. 沿Y向的位移, 由初始位置  $y = 0$  逐渐运动到最终位置  $y = 0.3$ . 在此过程中, 浮子在线性波浪

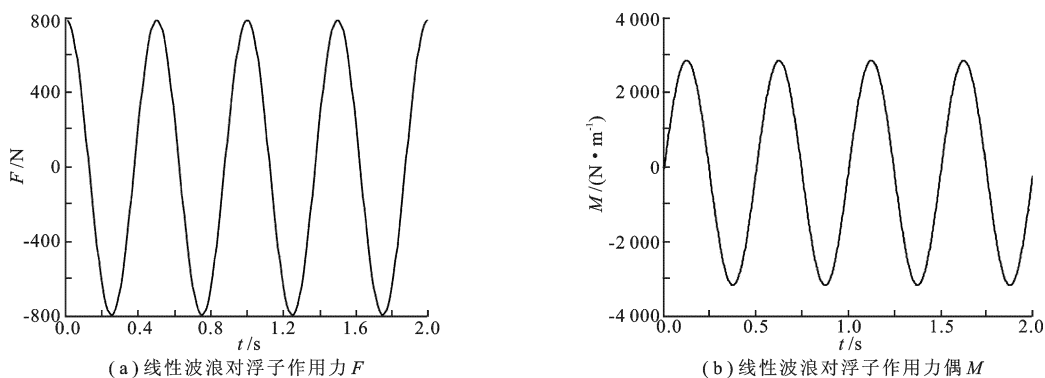


图 3 线性波浪对浮子的作用力及力偶

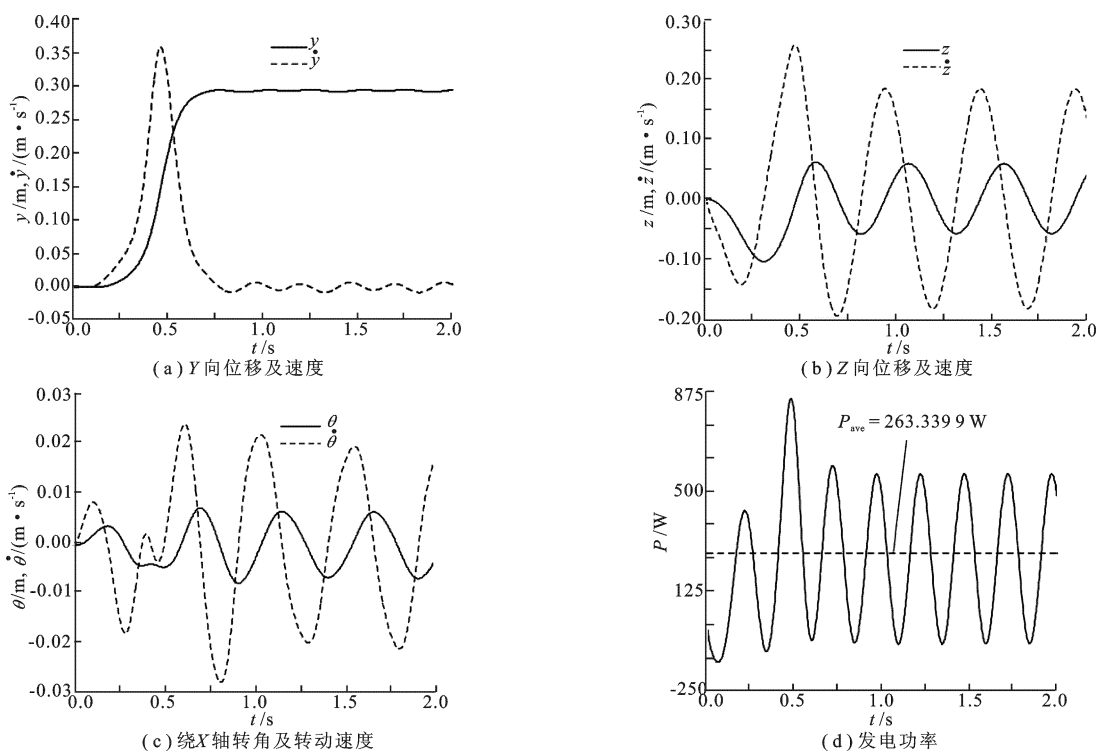


图 4 张拉整体并联机构波浪能采集装置浮子运动规律及发电功率

的作用下首先获得一定的动能,然后该动能慢慢转化为弹簧中的弹性势能,转化完毕后,浮子在 Y 向达到最大位移,并在此位置持续沿 Z 向做平动运动,同时绕 X 轴转动.对比图 4(b)和图 4(c)可以看出,浮子沿 Z 向的平动和绕 X 轴的转动均可近似为周期为 0.5 的周期运动.并且,在开始运动的 1.5 个周期内,浮子沿 Z 向的平动和绕 X 轴的转动具有一定的震荡,1.5 个周期过后浮子沿 Z 向的平动和绕 X 轴的转动逐渐变得平稳.综合图 4(a)~图 4(c)可以得出:浮子从波浪中吸收的能量主要转化为浮子沿 Z 向的平动动能和绕 X 轴的转动动能.图 4(d)为张拉整体并联机构能量采集装置的发电功率图,从图中可以看出,当  $t=0.5\text{ s}$  时,装置的瞬时功率到达最大值,产生此现象的原因主要是,此时浮子在 Y 向的动能达到最大.图 4(d)给出了装置的平均发电功率  $P_{\text{ave}}=263.3399\text{ W}$ .假定波浪的宽度与浮子的长度相同( $b=L=5\text{ m}$ ),则由式(16)可以得出,单位周期内的波浪包含的能量  $E=394.3986\text{ W}$ .通过式(18),计算张拉整体并联机构能量采集装置的能量采集效率  $\eta_{\text{ave}}=66.77\%$ .文献[13]对传统浮子式装置进行了能量采集分析,并将传统浮子式装置与张拉整体并联机构装置的浮子尺寸设为相同,可求出传统浮子式装置的能量采集效率  $\eta_{\text{con}}=61.40\%$ .张拉整体并联机构装置,因为可以同时将浮子俘获的平动动能和转动动能通过直线发电机转化为电能,所以它的能量采集效率比传统浮子式装置的提高了 5.37%.



## 4 结束语

提出了一种张拉整体并联机构波浪能采集装置,基于线性波理论和拉格朗日方程,建立了其动力学模型,并分析了浮子的运动规律,得到的主要结论如下:

(1) 在线性波浪的作用下,浮子运动平稳后,浮子在沿波浪传播方向上的动能几乎为零.浮子将吸收的波浪能主要转化为沿 $Z$ 轴的平动动能和绕 $X$ 轴的转动动能.

(2) 浮子沿 $Z$ 轴的位移和速度以及绕 $X$ 轴转动的转角及角速度均可近似为时间的周期函数,其周期与线性波浪的周期相同.

(3) 与传统浮子式装置相比,张拉整体并联机构装置可以同时将浮子的平动动能和转动动能转化为电能.因此,张拉整体并联机构装置的能量采集效率比传统浮子式装置的要高.

### 参考文献:

- [1] Zhang D, Li W, Lin Y. Wave Energy in China: Current Status and Perspectives [J]. *Renewable Energy*, 2009, 34(10): 2089-2092.
- [2] Montoya F G, Aguilera M J, Manzano-Agugliaro F. Renewable Energy Production in Spain: a Review [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2014, 33: 509-531.
- [3] Korde U A, Ertekin R C. On Wave Energy Focusing and Conversion in Open Water [J]. *Renewable Energy*, 2014, 62: 84-99.
- [4] Santiago O, Andres F O, Pablo A. Estimation of the Wave Power Resource in the Caribbean Sea in Areas with Scarce Instrumentation. Case Study: Isla Fuerte, Colombia [J]. *Renewable Energy*, 2013, 57: 240-248.
- [5] Jeff S, Paul J. Harvesting Ocean Wave Energy [J]. *Science*, 2009, 323(5918): 1176-1178.
- [6] Muliawan M J, Karimirad M, Moan T. Dynamic Response and Power Performance of a Combined Spar-type Floating Wind Turbine and Coaxial Floating Wave Energy Converter [J]. *Renewable Energy*, 2013, 50: 47-57.
- [7] Korde U A, Ertekin R C. On Wave Energy Focusing and Conversion in Open Water [J]. *Renewable Energy*, 2014, 62: 84-99.
- [8] Anbarsooz M, Passandideh-Fard M, Moghiman M. Numerical Simulation of a Submerged Cylindrical Wave Energy Converter [J]. *Renewable Energy*, 2014, 64: 132-143.
- [9] Vicinanza D, Contestabile P, Norgaard J Q H, et al. Innovative Rubble Mound Breakwaters for Overtopping Wave Energy Conversion [J]. *Coastal Engineering*, 2014, 88: 154-170.
- [10] McNatt J C, Venugopal V, Forehand D. The Cylindrical Wave Field of Wave Energy Converters [J]. *International Journal of Marine Energy*, 2013, 3: 26-39.
- [11] Falcão A F. Wave Energy Utilization: a Review of the Technologies [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2010, 14(3): 899-918.
- [12] McCormick M E. *Ocean Wave Energy Conversion* [M]. New York: Wiley, 1981.
- [13] McCormick M E. *Ocean Engineering Mechanics: with Applications* [M]. New York: Cambridge University Press, 2010.

(编辑: 齐淑娟)